

Исследование взаимосвязи напряжений в кристаллографических плоскостях с циклической долговечностью монокристаллов молибдена

Г. В. Цыбанев

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Результаты усталостных испытаний монокристаллов молибдена с шестью различными кристаллографическими ориентировками относительно оси нагружения проанализированы с точки зрения оценки предельного состояния с учетом их особенностей. Показано, что в отдельных случаях предельное состояние может быть описано на основе известных подходов с модификацией их применительно к свойствам монокристаллов и особенностям деформирования и разрушения в кристаллографических плоскостях.

Ключевые слова: усталостное разрушение, монокристалл молибдена, ориентировка кристалла, система скольжения, напряжение сдвига, нормальное напряжение, октаэдрическое напряжение, предельное состояние монокристалла.

Введение. Для описания предельного состояния материала при не одноосном нагружении разработано много критериев, обзор, анализ и обобщение которых выполнено в работах [1–4]. Их использование позволяет оценить условия наступления течения или разрушения материалов при сложном напряженном состоянии. Подобные критерии применяются также при не одноосном циклическом нагружении [2–5]. Экспериментальное подтверждение применимости этих критериев или установление новых чаще всего осуществляют на основе реализации необходимого напряженного состояния в макромасштабе. В то же время особенности зарождения усталостной трещины, инициируемой в кристаллографических плоскостях под действием максимальных касательных напряжений с последующим ее переходом в плоскость, перпендикулярную максимальным растягивающим напряжениям [6], свидетельствуют об условиях реализации локального сложного напряженного состояния на первой стадии ее роста в пределах поверхностного слоя материала.

Переход от макронапряжений, обычно определяемых для образцов и элементов конструкций, к напряжениям в элементах структуры материала на уровне зерна, где происходит зарождение усталостной трещины, предложен Данг Ваном [7] и применен к поликристаллическим конструкционным материалам. Однако более надежная проверка критериев зарождения усталостных трещин может быть осуществлена при исследовании монокристаллов, для которых известны расположение кристаллографических плоскостей и свойства кристалла в разных направлениях. Такой анализ необходим при разработке и использовании материалов с заданными прочностными свойствами при циклическом нагружении в определенном направлении [8].

Материал и методика исследования. Испытания на усталость проводили при симметричном растяжении–сжатии образцов круглого сечения диаметром 5 мм и длиной рабочей части 25 мм при частоте нагружения 36 Гц. Рабочую часть образцов выполняли из монокристаллов молибдена электронно-лучевой плавки, содержащих не менее 99,995% молибдена, с шестью ориентировками (на рис. 1 ориентационный треугольник). Наклепанный при механической обработке поверхностный слой снимали электрополировкой на глубину 1 мм. Перед испытаниями кристаллы представляли собой вытянутые вдоль оси роста субзерна длиной 8–15 мм, поперечным размером 0,5–2,0 мм и разориентировкой на углы 4...90°. Плотность дислокаций внутри субзерен по данным рентгеноструктурного анализа не превышала 10^8 см^{-2} [9].

В табл. 1 приведены некоторые характеристики исследованных монокристаллов, которые используются в последующем анализе локального напряженного состояния. Это прежде всего плоскость первичного скольжения, фактор Шмида λ , критическое напряжение сдвига для первичной плоскости скольжения $\tau_{кр}$, а также угол между осью нагружения и нормалью к вероятной плоскости скола β и угол между осью нагружения и нормалью к плоскости первичного скольжения α .

Т а б л и ц а 1

Данные о свойствах и ориентировке испытанных монокристаллов молибдена

Обозначение ориентировки	Плоскость первичного скольжения	λ	$\tau_{кр}$, МПа	α , град	β , град
1	{110}	0,377	38,0*	36	49,0
2	{110}	0,480	31,6*	42	38,0
3	{112}	0,500	100,0 [10]	54	43,0
4	{110}	0,500	26,0 [11]	45	25,0
5	{112}	0,472	17,5 [10]	34	0
6	{112}	0,315	36,4 [12]	23	54,0

Примечание. Звездочкой обозначены напряжения, определенные при растяжении со скоростью деформирования $6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

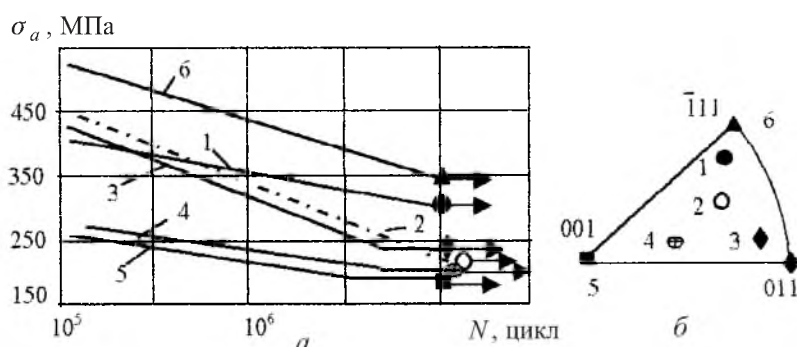


Рис. 1. Кривые усталости монокристаллов молибдена с кристаллографическими ориентировками 1–6 (а) и ориентационный треугольник (б) с указанием положения в нем испытанных кристаллов.

Результаты и их обсуждение. *Анализ разрушения кристаллов.* Исследование кинетики усталости монокристаллов молибдена с различной ориентировкой показывает [10], что усталостные повреждения локализуются в устойчивых полосах скольжения, где имеют место структурные изменения и реализуются микропластические деформации.

Процесс зарождения усталостной трещины происходит при низкой неупругой деформации, значительные уровни которой реализуются лишь в устойчивых полосах скольжения, о чем свидетельствует развитая дислокационная структура в зоне локализации деформации [13, 14]. При разрушении квазихрупким сколом важным физическим параметром кристалла является положение вероятной плоскости скола по отношению к оси внешнего нагружения. Фрактографические исследования показали, что долом кристаллов при усталостном разрушении происходит по плоскости скола (001), а при испытаниях кристаллов с ориентировкой 3 наблюдаются две плоскости скола: (001) и (011).

В результате металлографического анализа рельефа скольжения обнаружены некоторые особенности процесса скольжения в кристаллах с различной ориентировкой. Так, в кристаллах с ориентировками 1, 4, 5, 6 (в соответствии с нумерацией в табл. 1) имели место прямолинейные следы скольжения, в то время как в кристаллах с ориентировками 2 и 3 – волнистые следы, указывающие на развитие поперечного скольжения.

Исследования микрофрактографии усталостных изломов подтверждают, что основную часть циклической долговечности кристаллов занимает стадия зарождения кристаллографической трещины. Стадия распространения трещин, рассчитанная по числу усталостных бороздок, составляет 1-2% общей долговечности. Эти результаты, а также приведенные в [13, 14] свидетельствуют, что скольжение в кристалле при его циклическом нагружении не распространяется по плоскости скольжения по всему сечению образца, а лишь локализуется в субструктурном элементе, величина которого зависит от ориентировки монокристалла и уровня амплитуды напряжения. В зависимости от протяженности субструктурного элемента в направлении скольжения, характеристики сопротивления кристалла скольжению в данной кристаллографической плоскости, нормального напряжения к плоскости скольжения, расположения вероятной плоскости скола к плоскости скольжения и напряжения, перпендикулярного плоскости скола, формируется предельное состояние материала и происходит его усталостное разрушение.

Поскольку положение всех характеристик кристаллографических плоскостей испытанных кристаллов известно, предельное состояние в различных плоскостях может быть оценено при наличии данных по усталости кристаллов.

Результаты усталостных испытаний. Результаты испытаний представлены на рис. 1 в виде кривых усталости в традиционных координатах $\sigma_a - N$, где σ_a – амплитуда напряжений; N – число циклов до разрушения. (Номера кривых усталости соответствуют номерам ориентации кристаллов, присвоенным им в табл. 1 и приведенным в ориентационном треугольнике.) Как видно, наиболее высокие характеристики сопротивления усталости проявляют кристаллы с ориентировкой [111], а минимальные – с ориентировкой

[001]. Ниже с использованием прочностных характеристик кристаллов различной ориентировки и известных положений вероятных плоскостей скола и плоскостей скольжения выполнен анализ напряженного состояния в разных характерных плоскостях кристалла по предложенным ранее критериям предельного состояния материалов при циклическом нагружении [2, 3, 7], а также по некоторым модифицированным вариантам с учетом особенностей свойств монокристаллов. Анализ проводили для долговечности 10^6 цикл, так как для других долговечностей будут наблюдаться аналогичные закономерности.

Анализ локального напряженного состояния кристаллов. Поскольку зарождение усталостных трещин в металлах при нормальных температурах чаще всего связывается со скольжением дислокаций, представляется целесообразным определить и проанализировать амплитуды приведенных напряжения сдвига в первичной системе скольжения:

$$\tau_{1c} = \sigma_a \lambda, \quad (1)$$

где λ – расчетные значения фактора Шмида для первичной системы скольжения испытанных кристаллов (табл. 1).

В последнее время для прогнозирования многоциклового долговечности материалов в условиях пропорционального и непропорционального нагружения в основном используется подход, предложенный в работах [3, 15, 16], в которых значительное внимание уделялось механическому зарождению и развитию короткой трещины в плоскости действия максимального касательного напряжения с учетом влияния на этот процесс напряжений, нормальных к плоскости скольжения. Удовлетворительное описание усталостного разрушения материалов на основе так называемого подхода “критической плоскости” получено многими исследователями [17–19]. Поэтому первым шагом при анализе локального напряженного состояния испытанных кристаллов, которое приводит к их усталостному разрушению, был расчет амплитуды приведенных напряжений сдвига в первичной системе скольжения в соответствии с зависимостью (1), а также амплитуды двух нормальных напряжений: октаэдрических $\sigma_{окт}$ и перпендикулярных к плоскости скольжения $\sigma_{нпс}$. Результаты расчета с использованием данных табл. 1 представлены в табл. 2. Величину нормального напряжения к плоскости скольжения определяли по зависимости

$$\sigma_{нпс} = \sigma_a \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

где α – угол между направлением внешней нагрузки и нормалью к плоскости скольжения.

Для анализа использовалось также напряжение, нормальное к вероятной плоскости скола, определяемое как

$$\sigma_{нск} = \sigma_a \cos^2 \beta, \quad (3)$$

где β – угол между линией действия амплитуды напряжения σ_a и нормалью к вероятной плоскости скола.

Данные для анализа предельного состояния кристаллов при долговечности 10^6 цикл

Обозначение ориентировки	σ_a , МПа	$\sigma_{\text{окт}}$, МПа	τ_{1c} , МПа	$\sigma_{\text{нпс}}$, МПа	$\tau_{\text{н1с}}$, МПа	$\sigma_{\text{нск}}$, МПа
1	360	120,0	135,7	235,4	3,57	154,9
2	335	111,7	160,8	184,9	5,09	208,0
3	320	106,7	160,0	110,6	1,60	171,0
4	240	80,0	120,0	120,0	4,60	198,0
5	230	76,7	108,6	158,1	6,20	230,0
6	430	143,3	135,4	364,3	3,70	146,2

Примечание. σ_a – амплитуда приложенного напряжения; $\sigma_{\text{окт}}$ – нормальное октаэдрическое напряжение; τ_{1c} – напряжение сдвига в первичной системе скольжения; $\sigma_{\text{нпс}}$ – напряжение, нормальное к плоскости скольжения; $\tau_{\text{н1с}}$ – нормализованное напряжение сдвига в первичной системе скольжения; $\sigma_{\text{нск}}$ – напряжение, нормальное к плоскости скола.

По приведенным на рис. 2 результатам вычислений можно проанализировать влияние нормальных напряжений или его отсутствие на формирование предельного состояния кристаллов молибдена под действием сдвиговых напряжений в первичной системе скольжения. Полученные экспериментальные данные трудно трактовать в стиле классических критериев подобного рода (например, [15]), когда предельное состояние материала определяется суммой тангенциальной и нормальной составляющих в определенном соотношении. Однако при учете особенностей деформирования некоторых из испытанных кристаллов, оговоренных выше, такое соотношение может быть установлено. Это связано с тем, что в кристаллах с ориентировками 2 и 3 присутствует поперечное скольжение и, следовательно, их поведение (в анализируемом смысле) может отличаться от других кристаллов. С учетом этого факта на рис. 2,б построена линия, которая не включает результаты для кристаллов с ориентировками 2 и 3 и может быть описана зависимостью

$$\tau_{1c} = \tau_0 - b\sigma_{\text{нск}}, \quad (4)$$

где τ_0 и b – константы для рассмотренного случая, равные 186 МПа и 1/3 соответственно.

Для кристаллов с ориентировками 2 и 3 уравнение (4) дает консервативную оценку, так как эти точки лежат значительно выше предложенной зависимости. Однако, нам представляется, что рассчитанный уровень приведенных напряжений сдвига для этих кристаллов является “кажущимся” (160,8 и 160 МПа), поскольку наличие поперечного скольжения способствует уменьшению их значений, и в действительности они уменьшаются до уровня, близкого к кристаллам с ориентировками 1, 4–6, т.е. к зависимости (4).

Отметим, что был также выполнен анализ максимальных и октаэдрических касательных напряжений в сочетании с различными нормальными напряжениями, который, как и приведенные на рис. 2,а,в данные, не позволил установить функциональную взаимосвязь между ними.

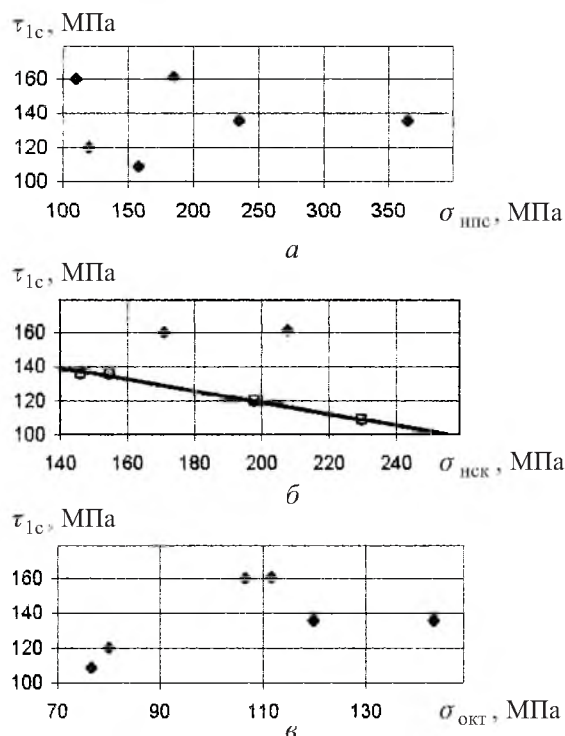


Рис. 2. Напряжение сдвига в первичной системе скольжения в зависимости от напряжений, нормальных к плоскости сдвига (а), к плоскости скола (б), и нормальных октаэдрических напряжений (в). Точки – экспериментальные данные для анализа предельного состояния кристаллов.

Дальнейший анализ проведен с учетом того, что критическое напряжение сдвига является важным параметром в достижении предельного состояния кристалла, и в то же время это напряжение не принималось во внимание в анализе, рассмотренном выше. Расчетные данные по действующим в первичной системе скольжения сдвиговым напряжениям при исследуемой долговечности (табл. 2) и экспериментальные данные по их критическим значениям (табл. 1) показывают, что для всех испытанных кристаллов действующие сдвиговые напряжения значительно превышают критические, что может существенно влиять на уровень микропластических деформаций, реализуемый в зонах скольжения, и, следовательно, на предельное состояние материала. Поэтому далее при анализе использовали нормализованную величину напряжений сдвига в первичной системе скольжения, которая определена как

$$\tau_{н1с} = \frac{\tau_{1с}}{\tau_{кр}}. \quad (5)$$

С учетом рассмотренного выше влияния на процесс скольжения нормальных напряжений на рис. 3 представлены данные для исследуемых кристаллов в координатах нормализованное напряжение сдвига в первичной системе скольжения – нормальное напряжение. В качестве нормальных

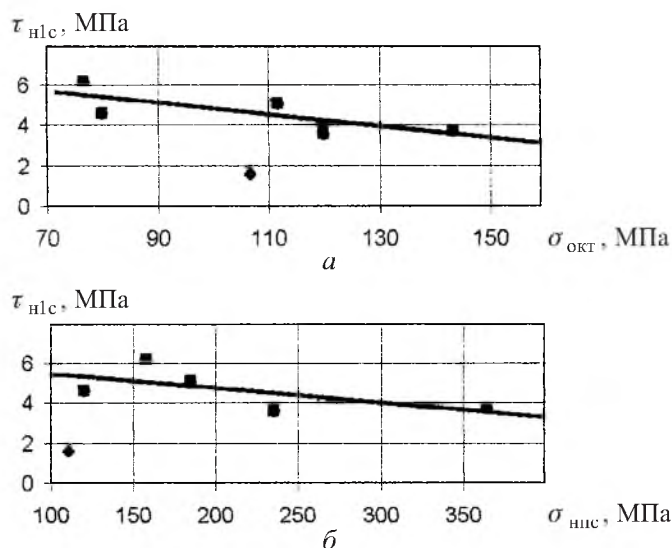


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости нормализованного напряжения сдвига в первичной системе скольжения от напряжений, нормальных к плоскости сдвига (*a*), и нормальных октаэдрических напряжений (*б*).

напряжений использовали октаэдрическое и напряжение, нормальное к плоскости скольжения. Расчетные данные для большинства кристаллов с некоторым разбросом подчиняются линейной зависимости, за исключением кристалла с ориентировкой 3 как для первой (рис. 3,*a*), так и для второй (рис. 3,*б*) зависимости. Отклонение экспериментальных данных для этого кристалла в сторону более низкой прочности автором связывается с установленным наличием двух плоскостей скола, что увеличивает вероятность его усталостного разрушения при более низких, чем у других кристаллов, соотношениях анализируемых напряжений. Для большинства же кристаллов их предельное состояние при рассматриваемой долговечности может быть описано соотношениями в соответствии с рис. 3:

$$\tau_{\text{нлс}} = \tau_{\text{нс}} - b_{\text{нс}} \sigma_{\text{нпс}}, \quad (6)$$

$$\tau_{\text{нлс}} = \tau_{\text{но}} - b_{\text{но}} \sigma_{\text{окт}}, \quad (7)$$

где $\tau_{\text{нс}}, \tau_{\text{но}}, b_{\text{нс}}, b_{\text{но}}$ – постоянные, определенные по приведенным данным, $\tau_{\text{нс}} = 6,18$; $\tau_{\text{но}} = 7,74$; $b_{\text{нс}} = 0,007$; $b_{\text{но}} = 0,029$. Уравнения (6), (7) дают неконсервативную оценку усталостного разрушения кристаллов с ориентировкой 3 и отражают влияние соответствующих нормальных напряжений на уровень превышения напряжением сдвига в первичной системе скольжения его критического значения для достижения предельного состояния кристалла при заданной долговечности. Увеличение нормального напряжения приводит к снижению уровня нормализованного напряжения сдвига. Указанные уравнения могут также трактоваться как модификация известных критериев, учитывающих влияние нормальных напряжений на касательные

для достижения предельного состояния с учетом физического фактора, характерного для монокристаллов, а именно: критического напряжения сдвига. Следует также отметить, что сравнение постоянных $b_{нс}$ и $b_{но}$ свидетельствует о более высокой чувствительности предельного значения $\tau_{н1с}$ к величине нормального октаэдрического напряжения по сравнению с нормальным к плоскости скольжения.

Кроме установленных соотношений напряжений, определенных зависимостями (4), (6), (7), были проанализированы и другие соотношения тангенциальных (октаэдрических, максимальных) и нормальных напряжений, а также их нормализованных значений, для которых не получена удовлетворительная корреляция.

Выводы

1. Результаты усталостных испытаний монокристаллов молибдена с различной кристаллографической ориентировкой относительно оси одноосного нагружения проанализированы с точки зрения локального сложного напряженного состояния в характерных кристаллографических плоскостях, по которому можно определять предельное состояние кристалла.

2. Описание предельного состояния монокристаллов затруднено при наличии скольжения в нескольких системах и реализации нескольких плоскостей квазихрупкого скола.

3. В качестве характеристики предельного состояния испытанных монокристаллов молибдена может быть принято эквивалентное напряжение, представляющее собой линейную взаимосвязь между напряжением сдвига в системе первичного скольжения и напряжением, нормальным к плоскости вероятного квазихрупкого скола. Такая зависимость дает консервативную оценку долговечности кристаллов, проявляющих скольжение в нескольких системах.

4. Критерий предельного состояния при усталости монокристаллов молибдена может быть сформулирован также с учетом характерной для них величины – критического напряжения сдвига. Долговечность до разрушения кристалла определяется уровнем превышения действующим напряжением сдвига в первичной системе скольжения его критического значения и действующим нормальным напряжением (октаэдрическим или нормальным к плоскости скольжения).

5. Полученные результаты могут быть полезными при определении оптимальных усталостных характеристик элементов конструкций из монокристаллов в заданном направлении нагружения.

Резюме

Результати випробувань на втому монокристалів молібдену з шістьма різними кристаллографічними орієнтуваннями відносно осі навантаження проаналізовано з точки зору оцінки граничного стану з урахуванням їх особливостей. Показано, що в окремих випадках граничний стан може бути описаний на основі відомих підходів із модифікацією їх стосовно властивостей

монокристалів та особливостей деформування і руйнування в кристалографічних площинах.

1. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1969. – 211 с.
2. Garud Y. S. Multiaxial fatigue: a survey of the state of the art // J. Test. Eval. – 1981. – **9**, No. 3. – P. 165 – 178.
3. Socie D. F. Multiaxial fatigue damage models // ASME J. Eng. Mater. Technol. – 1987. – **109**. – P. 293 – 298.
4. Macha E. and Sonsino C. M. Energy criteria of multiaxial fatigue failure // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1989. – **22**. – P. 1053 – 1070.
5. Flavenot S. F. and Skalli N. A comparison of multiaxial fatigue criteria incorporating residual stress effect // Biaxial and Multiaxial Fatigue. – London: Mech. Eng. Publ., 1989. – P. 437 – 457.
6. Forsyth P. J. E. A two stage process of fatigue crack growth // Crack Propagation: Proc. Cranfield Symp. – London: Her Majesty's Stationary Office, 1962. – P. 76 – 94.
7. Dang Van K., Gailletaud G., Elavenot J. F., et al. Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading // Biaxial and Multiaxial Fatigue. – London: Mech. Eng. Publ., 1989. – P. 459 – 478.
8. Рубель О. В., Яценко В. К., Банас Ф. П. и др. Оценка выносливости монокристаллов жаропрочных сплавов на никелевой основе // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні. – 1998. – № 2. – С. 38 – 41.
9. Бега Н. Д., Хамаза Л. А., Цыбанев Г. В. и др. Циклическая прочность монокристаллов молибдена при комнатной температуре // Пробл. прочности. – 1981. – № 10. – С. 60 – 63.
10. Sherwood P. I. and Cuiu F. Orientation dependence of stress-strain characteristic at a chosen elevated deformation temperature // Canad. J. Phys. – 1967. – **45**. – P. 1075 – 1080.
11. Richter J. The influence of temperature on slip behavior of molibdenum single crystals deformed in tension in the range from 293 to 573 K // Phys. Stat. Solids. – 1970. – **40**, No. 2. – P. 565 – 572.
12. Irwin G. I., Cuiu F., and Pratt P. L. The influence of orientation on slip and hardening of molibdenum single crystals // Ibid. – 1974. – **22**. – P. 685 – 698.
13. Троценко В. Т., Засимчук Е. Э., Бега Н. Д. Кинетика изменения субструктуры в монокристаллах молибдена при усталости // Физика металлов и металловедение. – 1978. – **45**, № 4. – С. 850 – 858.
14. Бега Н. Д., Засимчук Е. Э., Каверина С. Н., Фирстов С. А. Дислокационная структура и локализация деформации в процессе усталости монокристаллов молибдена // Металлофизика. – 1980. – **2**, № 1. – С. 71 – 78.

15. *Findley W. N.* A theory for the effect of mean stress on fatigue under combined torsion and axial load or bending // *Trans. ASME.* – 1959. – Ser. B. – **81.** – P. 301 – 306.
16. *McDiarmid D. L.* A general criterion for high cycle multiaxial fatigue failure // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1991. – **14.** – P. 429 – 453.
17. *Park J. and Nelson D.* Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life // *Int. J. Fatigue.* – 2000. – **22.** – P. 23 – 39.
18. *Papadopoulos I. V.* Critical plane approaches in high-cycle fatigue: on the definition of the amplitude and mean value of the shear stress acting on the critical plane // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1998. – **21.** – P. 269 – 285.
19. *Morel F. A.* Critical plane approach for life prediction of high cycle fatigue under multiaxial variable amplitude loading // *Int. J. Fatigue.* – 2000. – **22.** – P. 101 – 119.

Поступила 14. 11. 2001